中文词汇语义加工过程的计算模拟与实验验证*

李兴珊[1,2]，张淇玮[1,2]，黄林洁琼[1]

([1]中国科学院心理研究所行为科学重点实验室，北京，100101)

([2]中国科学院大学心理学系，北京，100039)

摘 要 中文是全球华人广泛使用的文字，特点鲜明。由于其特异性，西方语言理论和模型无法直接应用于中文。现有中文词汇加工研究中，缺乏系统的计算模型来模拟词汇语义加工过程。本研究旨在通过计算建模和实验研究方法解决上述问题。研究将系统回顾中文词汇加工已有研究并进行元分析，构建模型以模拟中文词汇在孤立呈现及句子语境中的加工过程。该模型能够加工单字词和多字词，模拟词的形、音、义的加工过程及交互作用，并考虑语境中上下文的影响。最后，通过实验研究验证模型假设。本研究建立的中文词汇语义加工模型有助于理解中文阅读特异性认知机制和词汇加工的动态过程。

关键词 认知模拟，词汇加工，语义加工，中文阅读，计算模型

分类号

1 研究意义

近年来，建模方法在理解语言认知机理方面发挥着重要作用。一方面，通过不断完善模型参数和结构，能够较准确地刻画认知加工过程。另一方面，模型可以在一个框架内模拟和解释众多实验数据，包括使用不同研究设计采集的数据和某些不一致的结果。西方学者针对字母语言的阅读认知机制进行了大量研究，并提出了相应的理论和模型(Dehaene, 2009; Engbert & Kliegl, 2011; Reichle, 2021; Reichle et al., 1998; Seidenberg, 2017)。然而，在过去一段时间，研究人员已经认识到，针对字母语言的研究结果和计算模型并不总是能推广到不同的书写系统(Share, 2008)。

中文是表意文字，具有许多特性。首先，中文书写系统使用的是汉字而不

收稿日期：2023-12-06

* 国家自然科学基金项目(32371156)。

通信作者：李兴珊，E-mail: lixs@psych.ac.cn 张淇玮，E-mail: zhangqw@psych.ac.cn

是字母。与字母或单词相比，汉字及其构成的字符串承载了较多的语义信息和较少的语音信息。其次，中文词长较短，大多只有一两个字，而德语、芬兰语等语言的词语长度往往超过 10 个字母。最后，中文文本中没有标识词边界的空格，于是中文读者必须以某种方式从连续的字符串中切分并识别词。因此，为字母书写系统开发的模型并不总是适用于表意文字系统(Li et al., 2022)。目前，还没有为中文的词汇语义加工专门设计的计算模型。建立这样一个模型有利于理解中文词汇加工的认知机制，并能够指导后续研究。此外，通过将中文词汇加工模型和基于字母语言提出的其他模型对比，有利于理解跨语言普遍性与特异性的阅读认知机制。

本研究拟聚焦中文词汇语义加工，基于对以往实验研究结果的分析和总结，提出原创性理论假设，并建立中文词汇语义加工的计算模型以模拟孤立词的语义加工过程；随后进一步探究语境对词汇语义加工的影响机制，构建能够模拟句子阅读过程中词汇语义加工的计算模型；最后，通过实验对模型中的重要假设和预测进行验证，并根据实验结果进一步修正和优化计算模型。本研究具备新颖性、交叉性和开创性，有助于理解中文阅读特异性的认知机制，进而推动跨语言比较和语言认知科学相关领域的发展。

2 研究现状及发展动态分析

2.1 中文复合词加工的认知机制

在词汇加工研究领域，一个重要问题是词是作为一个整体还是通过分解进行加工。受研究方法、任务和语料的影响，该领域的研究结果多样。在中文阅读中，一些研究结果支持整体加工。首先，眼动实验发现，人为干扰词作为整体进行加工（如在词内插入空格）导致词汇加工速度变慢(Bai et al., 2008; Li et al., 2013)。第二，在拼音文字和中文阅读中都存在词优效应(申薇, 李兴珊, 2012; Reicher, 1969)。表现为与出现在非词中的字（如“审卖”中的“审”）相比，识别真词中的字（如“审查”中的“审”）更快、更准确。最后，中央凹和副中央凹加工的眼动实验结果表明，与短语相比，三字习语条件下预视效应更大，说明习语在表征和加工时被作为一个独立的单元(Yu et al., 2016; Zang, 2019)。另一些研究则关注字频效应，假设复合词加工中的字频效应反映分解的加工过程。但已有结果并不一致。有的研究发现了字频的促进作用(王春茂, 彭聃龄, 1999; Tse &

Yap, 2018; G. Yan et al., 2006)，另外一些发现了阻碍作用(Cui et al., 2021; Xiong et al., 2023; Yu et al., 2021)，还有一些研究未发现显著的字频效应(Li et al., 2014; Ma et al., 2015)。中文的特殊性在于汉字具有丰富且独立的信息表征，多数情况下，一个汉字对应一个语素，既能表示字形和字音，也蕴含丰富的语义。曹海波等（2023）发现中文读者能够利用语素特征帮助词切分和词识别。这些书写系统的特异性可能使中文复合词的加工机制更复杂。

除了正字法水平的加工，在语义水平上也存在整体和分解加工的争论。掩蔽启动范式的研究结果表明，与仅共享字形而语素语义不同的条件相比，当启动词和目标词语素语义也相同时，对目标词的识别速度更快(Tsang et al., 2014; Tsang & Chen, 2013; X. Zhou & Marslen-Wilson, 2000)。该结果说明在词汇识别早期阶段，读者加工了语素语义。来自神经影像学的证据同样支持语义分解加工的观点。左侧颞叶前部在短语加工研究中被证明与语义合成有关(Bemis & Pylkkänen, 2011; Flick et al., 2018; Pylkkänen, 2020; Westerlund & Pylkkänen, 2014)。一项脑磁图研究比较了中文读者在加工并列、偏正、动宾复合词或单语素词时的神经活动模式，结果显示加工复合词时该区域激活增强，这提示中文复合词加工存在语义合成的过程 (Hsu et al., 2019)。然而，利用句子阅读任务下的眼动跟踪研究却发现，成分语素的语义并不会参与句子语义整合，而是以词为单位整体加工语义(Shen et al., 2018; J. M. Yang et al., 2012; J. Zhou & Li, 2021)。

以往研究对于复合词加工的认知机制得到了不同结果，采用整体还是分解加工，以及语素加工和复合词加工之间存在怎样的关系，目前还没有答案。针对同一个研究问题，不同的研究得出了不同的结果与结论。例如，字频的效应在不同研究中不一致，难以确定是否能够被作为词汇分解加工的证据。因此，需要探讨导致矛盾结果的原因，以及是否存在其他合理解释。

2.2 词汇加工中语音通路的作用

针对语音通路在词汇加工中的作用，研究者关注两个问题：视觉词汇加工中词汇语音信息是否激活，以及语音对通达词汇语义信息是否起到中介作用。为了探测语音信息的激活，研究者采用同音假词作为材料，拼音文字和中文研究的结果都发现了同音假词效应。由于受到同音词的干扰，识别同音假词的速

度比识别非同音假词更慢，这提示视觉词汇加工中激活了语音信息(Van Orden & Kloos, 2005; X. Zhou et al., 2009)。此外，句子阅读研究发现了语音线索的促进作用(W. Zhou et al., 2018)和绕口令效应(McCutchen & Perfetti, 1982; S. Zhang & Perfetti, 1993)，同样支持了语音信息在视觉词汇加工中激活(详见 Rayner et al., 2011)。

中文阅读中，关于语音在词汇语义理解中的作用，主要存在两种理论。语音中介理论主张语音是词汇识别的重要组成部分，为词汇识别提供了早期制约，而不是可有可无的过程或副产品(Tan & Perfetti, 1997, 1998, 1999)。Leck 等 (1995) 采用语义分类任务，发现复合结构单字词的任务表现同时受到字形和语音信息的影响，简单结构单字词的任务表现只受字形的影响。另一项中文双字词识别的研究发现，同音异义启动词比无关启动词对目标词的语义判断产生了更大的干扰(Tan & Perfetti, 1999)。直接语义通达理论则认为词形直接激活语义信息，在中文视觉词汇识别中不存在语音加工，并且/或者语义激活时间早于语音(Tan & Perfetti, 1997; Wong et al., 2014)。早期的行为研究使用启动范式，通过操控启动词与目标词之间的时间间隔，考察形、音、义激活的时间进程，其逻辑是认为最小的启动效应时间间隔可以反映激活表征所需的时间，不同研究结果支持不同的理论。Perfetti 和 Zhang (1995) 发现在单字词识别任务中，语音干扰效应出现的时间早于语义干扰，符合语音中介理论的预期。然而，Zhou 等（2000）在双字词判断任务中发现语义信息的激活早于语音，而在词汇命名任务中，语音与语义的激活几乎同时，这些结果不支持语音中介理论。这类研究普遍存在两个问题，一方面 Perfetti 等 (2005) 指出，相对时间进程并不能作为语音中介通达语义的证据，因为即使不通过语音中介通路，语义激活时间也可能晚于语音激活；另一方面，这类研究的实验操作与自然阅读中的词汇加工差异很大，存在外部效度较差的问题。

当前研究对中文词汇识别中语音加工的相关问题探讨不充分，语音通路的激活对语义通达的作用有待进一步研究。虽然有一些证据表明在中文阅读过程中激活了词的语音信息，但是否可以通过语音中介通达语义还没有定论。

2.3 语境对中文词加工的影响

在自然阅读中，词汇加工并非孤立发生，而是嵌入在句子里，这就会受到

相邻词及句子语境的影响。句子中的词汇加工比孤立呈现的词的加工更复杂，主要体现在以下几个方面。

第一，中文句子里缺乏明确的词边界标记，故中文阅读首先需要确定哪几个字表示一个词。在缺少低水平视觉线索（如空格）的情况下，中文读者需要依赖更高水平的信息（如语言知识和语境）实现词切分，这一点与拼音文字不同。词切分的认知机制研究揭示其包含两个加工阶段：在第一个阶段，读者根据词频等局部信息得到初始切分结果；在第二个阶段，读者根据句子语境检查初始切分是否正确，错误切分则需要额外的修正时间(Huang et al., 2021; Huang & Li, 2020; Inhoff & Wu, 2005; Li et al., 2009; Ma et al., 2014; J. Zhou & Li, 2021)。以往基于字母语言构建的词汇加工模型难以模拟具有中文特异性的词汇和句子加工过程。

第二，句子阅读时的词汇加工会受到视觉注意和阅读方向的影响。在研究中文孤立词的加工的实验中，一个词的所有字往往同时出现在读者的知觉范围内，也就能够被同时加工。然而在句子阅读时，读者的眼睛从左向右移动，注视位置不固定。因此，一个词中的多个字在加工时序上可能存在差异，靠近注视点的字会比远离注视点的字先得到加工。另外，一次注视可以同时加工多个字，而这些字可能属于同一个或几个不同的词。这些现象在孤立词的加工中不存在，却都有可能对词汇加工机制造成影响。

第三，句子语境影响词汇加工。研究发现预测性高的词比预测性低的词阅读时间更短，这说明读者在阅读中利用前文语境持续预测，预先激活的信息对词汇语义通达产生促进作用(刘志方 等, 2020; Cui et al., 2022; Rayner et al., 2005; Yao et al., 2022)。此外，语境还能够帮助读者在加工歧义词时快速选择合适的语义(Shen & Li, 2016)。例如，“火星”一词既可以表示特定的行星，也可以表示可能引起火灾的事物，具体表达的含义需要根据上下文语境来确定。

由此可见，句子中的词汇加工与孤立词的加工存在一些差异，而以孤立词为对象得到的研究结论不一定适用于句子阅读。句子中词汇的加工往往比单独呈现时更复杂，与孤立词的加工机制可能存在差异。当前探讨词汇加工机制的模型极少考虑句子的影响。因此，为了完整地理解中文词汇语义加工的认知机制，有必要进一步探讨句子特征和语境在词汇认知中的作用。

2.4 词汇加工认知模型的发展

为了理解语言的加工机制，学者们建立了许多认知模型。交互激活模型(McClelland & Rumelhart, 1981)影响极大，它很好地解决了自下而上和自上而下的信息是如何交互的这一问题。该模型提出的交互激活框架适用于大部分认知过程。在阅读中，只有将从视觉中获得的文字信息与大脑中存储的语言知识和世界知识进行整合后才能理解语言的内容。另一类著名的词汇加工模型是三角模型。该模型利用连接主义模型的思路，假定词汇的正字法、语音和语义信息均采用分布式表征，词汇加工通过正字法、语音和语义这三个双向连接的子网络实现。模型用来模拟读者利用字形信息拼出词的读音的过程(Plaut et al., 1996; Seidenberg & McClelland, 1989)，也用来模拟利用字形信息通达语义的过程(Harm & Seidenberg, 2004)。其中，Plaut 等人(1996)重点解决读者如何读出形-音对应不规则的词，他们认为，无论是规则词还是不规则词，都通过一种类似神经网络的系统提取其读音，而没有单独的通路。在这个模型中，系统关于正字法和语音之间映射关系的知识被编码在单元间的加权连接中，通过学习不断调整连接权重。该学习过程受到训练集的词频统计规律的驱动，能够捕捉规则与不规则之间的连续性，并在其内部表征中自然地反映这种变化，因此模糊了规则词和不规则词之间的区别，使得模型能够灵活处理不规则输入。Harm 和 Seidenberg (2004)利用三角模型，成功模拟了英文词汇加工过程中语音中介通路和直接语义通路的分工合作机制。连接主义模型虽然能够较好地模拟一些行为结果，但由于参数较多，可理解性不高。

这些模型在理解拼音文字的认知机制方面具有重要意义，尤其是在帮助人们理解从字形到语音的转换过程中起到关键作用。但由于中文文字与拼音文字具有不同的特点，它们通常难以适用于中文。在拼音文字中，字母对应音素，通过音素拼接能快速获得词的读音，进而识别词汇和通达语义(Tan & Perfetti, 1997)。然而，在中文文字中，每个字对应一个音节，读者无法通过偏旁部首拼出字音，只有在识别整个字后才能得到读音。因此，有学者认为中文的语义通达较少依赖语音中介通路(Perfetti et al., 2005)。

过去，学者们围绕中文阅读构建了一些计算模型，对指导中文阅读的研究起到了非常重要的作用(Li et al., 2009; Li & Pollatsek, 2020; Perfetti et al., 2005; J.

F. Yang et al., 2009)。然而，已有的中文阅读模型存在如下问题。第一，大部分模型集中在汉字水平或单字词水平(Perfetti et al., 2005; J. F. Yang et al., 2009)。模型引入偏旁部首和汉字的表征节点，能够模拟偏旁部首的特征对汉字识别时间的影响及字频效应 (e.g., Chang et al., 2016; Hsiao & Shillcock, 2004, 2005; Xing et al., 2002, 2004)。Perfetti et al. (2005) 的模型虽然进一步引入了语义和语音节点，实现由字形到语音和语义的输出，但仍局限于单字词识别。然而，在现代汉语中，由两个或两个以上的字构成的多字词占据大部分。单字词和多字词的加工机制存在差异，多字词的识别涉及到整体还是分解加工的问题，如果是分解加工，则需要解释如何从单个语素的意思组合得到多字词的语义，以及如何确定多义字在词中的确切语义。

第二，基于交互激活框架，研究者针对中文多字词加工提出的一些模型框架，意在解释中文字词识别的重要发现 (Peng et al., 1999; Taft & Nguyen-Hoan, 2010; Tan & Perfetti, 1999)。Tan 和 Perfetti (1999) 的视觉词汇识别模型包含正字法、语音、语义三模块，模块间存在交互激活；同时，在正字法和语音信息的加工模块中，都存在双向连接的汉字表征和多字词表征。该模型假定字识别对多字词识别存在促进作用，但无法解释一些研究中发现的字频抑制效应。X. Zhou 和 Marslen-Wilson (2000) 提出的多层级词汇加工框架虽然包含了形、音、义三模块，但在这一框架中，由于不存在独立的词形和词音表示，难以解释中文阅读研究里广泛发现的基于词的加工模式，如“词优效应”等 (Chen et al., 2018; Shen et al., 2018; J. M. Yang et al., 2012)。Peng 等 (1999) 的模型不涉及语音表征，而是包含正字法和词汇表征两个系统。在正字法系统中存储字，在表征系统中存储语素和词。正字法层的字符节点通过层级间连接激活表征层内对应的语素节点和词汇节点，连接强度随词频增加而增强。在词汇表征层内，语义透明词的语素和词汇节点之间为激励性连接，不透明词的语素和词汇之间为抑制性连接。该模型预测词汇语义透明度和整词词频同时调节字频效应，但对于语义信息何时开始加工，及其与词形表征之间存在怎样的关系尚不明确。Taft 和 Zhu (1997)最初构建的中文多字词加工框架在正字法、语音和语义模块均包含字与多字词的表征。在更新后的框架中，Taft 等 (1999)增加了抽象表征的词元层，连接正字法、语音和语义，且不存在整词的正字法和语音表征。然而，

词元层表征了什么信息，以及语音通路在中文多字词加工中的作用并没有清晰的假设。

值得注意的是，以上基于交互激活框架提出的中文词汇加工模型并未利用计算机程序实现，也未拟合实验数据。严格地讲，这些框架并非计算模型，它们无法模拟字词加工复杂的动态过程。由此可见，多字词的加工机制是理解中文词汇加工的核心问题，但是目前还没有一个正式的计算模型可以解决该问题。

第三，大部分已实现的词汇模型关注了字形加工和从字形到语音的通路，但较少涉及多字词语义层面的加工 (Xing et al., 2002, 2004; J. F. Yang et al., 2006, 2009, 2013)。考虑到中文中复杂的字词关系，词汇语义加工仍是一个难题。而对于句子阅读中的词汇加工，还需要解释语境对词汇语义通达的影响。Li 和 Pollatsek (2020) 提出的中文阅读模型 (Chinese Reading Model, CRM) 模拟了句子加工过程中词切分、词识别及眼动控制，其中也包括了字词识别的过程。该模型假设当眼睛注视在一个位置时，所有能感知到的字都会被并行地识别出来。这些被识别出来的字组成的词都会被激活，而这些被激活的词互相竞争；当一个词在竞争中取得胜利后，这个词就被识别并切分出来。因此，这个模型认为中文词切分和词识别是同时发生的统一的过程。CRM 成功地解释了中文阅读过程中词切分及眼动控制的认知机理。然而，值得注意的是，CRM 主要关注从字形到词条的加工，没有关注语义及语音的作用。因此，该模型还需要进一步完善，以解释语音和语义在阅读中的作用。

当前中文词汇加工的认知模型相关的研究还存在一些亟待解决的问题，缺乏系统的词汇语义加工的计算模型。一方面，针对拼音文字提出的认知模型难以直接应用于中文；另一方面，以往的中文认知模型或者关注从字形到语音的加工，或者关注字形到词条的识别，尚未有模型能够完整地描述中文词汇加工过程中形、音、义的动态交互。此外，多数中文阅读模型仅关注单字词的加工，缺乏对多字词加工过程的模拟。这些模型的局限限制了其应用范围。

3 问题提出

本研究关注中文词汇语义加工，拟采用计算建模方法探究其认知机制，并通过实验验证理论假设。具体将围绕以下三个核心问题展开：

第一，从整体与局部竞争的视角，探讨中文复合词加工中单字词是否激活

并与整词竞争，进而解释语素加工和复合词加工之间的关系。大部分的中文多字词都是复合词，由两个或多个语素组成。以往研究尝试区分整体或分解加工的理论，然而这些理论均有很多无法解释的研究结果。本研究旨在提出并通过模型验证一种新的理论假设，即在复合词加工过程中，局部单字词和整词表征在视觉词汇、语音词汇以及语义层面都被激活，并互相竞争，竞争取胜的词被识别。

第二，探讨阅读中词汇的语音中介通路与直接语义通路的分工。中文是表意文字，与拼音文字的拼读机制不同，在形、音、义的加工机制也存在不同。以往有关中文字词识别的模型仅考虑了单字词的加工，尚未解决多字词加工过程中语音通路的问题。但多字词与单字词的加工存在差异，中文同音字较多（平均每个汉字有 4 个同音字），通过单字词的读音会通达多个语义，因此语音中介通路的效率较低。然而，多字词的同音现象较少，可以更容易地通过语音激活相应的语义单元，因此更有可能通过语音中介通达语义。本研究将着重探究多字词加工时，语音中介通路与直接语义通路交互协作，从而通达语义的认知计算过程。拟通过建模的方法，研究在中文词汇加工过程中，形、音、义是如何动态激活的，并重点探讨这些加工的认知框架及认知过程如何实现。特别关注中文阅读过程中如何激活语音信息，激活的语音信息是否能够通达语义，以及语音中介通路和直接语义通路之间的关系等具体研究问题。

第三，从句子阅读的视角，探讨语境影响词汇语义加工的认知机制。当前探讨词汇加工机制的研究及模型极少考虑句子语境的影响。在句子阅读时，词汇的加工往往受到语境的影响。本研究将探讨如何建立模型、采用怎样的假设，以模拟句子阅读中语境影响词汇语义加工的研究发现，包括语境影响多义词的理解，语境影响词切分，以及通过语境预测下一个词。重点考察如下两种假定的加工方式能否模拟语境影响词汇加工的认知过程：第一、在看到目标词之前，根据语境信息预先激活一些词的语义表征，从而影响目标词的加工；第二、在看到目标词之后，前文语境通过影响不同语义表征的竞争优势来影响词汇加工。值得注意的是，这两种假设并不互斥。在建模过程中，模型将使用某一种或同时使用这两种机制来实现对不同任务的模拟。

综上，中文词汇加工是一个复杂的认知过程。本研究围绕该问题从词汇加工的不同视角出发，采用不同技术方法展开，共包含四个部分。第一部分通过

元分析全面梳理中文词汇加工机制研究的现有成果，从整体上理解已有研究的结果和结论，发现不同研究结果的潜在影响因素，并提出理论假设。基于这些假设，第二部分拟建立计算模型模拟中文孤立词的语义加工过程。该模型能够模拟词汇加工过程中形、音、义激活的动态过程，并能够拟合经典的研究发现。通过暂时忽略语境对词汇加工的影响，可以将模型的复杂性维持在可控范围内。在此基础上，第三部分将建立能够模拟句子阅读过程中词汇语义加工的计算模型，重点解决句子加工过程中词汇加工出现的问题，并阐明以往孤立词与句子阅读研究结果不一致的原因。第四部分拟设计实验对模型中的一些重要假设进行验证，重点验证模型在复合词加工过程中提出的单字词与整词的竞争机制等核心假设。实验结果将帮助我们进一步修正模型，并通过逐步迭代优化计算模型，从而更好地理解中文阅读词汇语义加工认知机制。

4 研究构想

本研究聚焦中文词汇语义加工，采用元分析、计算建模与实验研究等方法，从复合词整体与局部加工、词汇形音义模块交互、句子阅读中的词汇加工等视角开展研究。本研究旨在创新理论假设，构建中文特有的词汇语义加工计算模型，并通过实验验证。此工作将揭示中文词汇语义加工的动态过程，包括单独呈现和句子中的词汇加工，以阐明中文阅读的特异性认知机制。研究将按以下四个部分展开，总体框架见图 1：

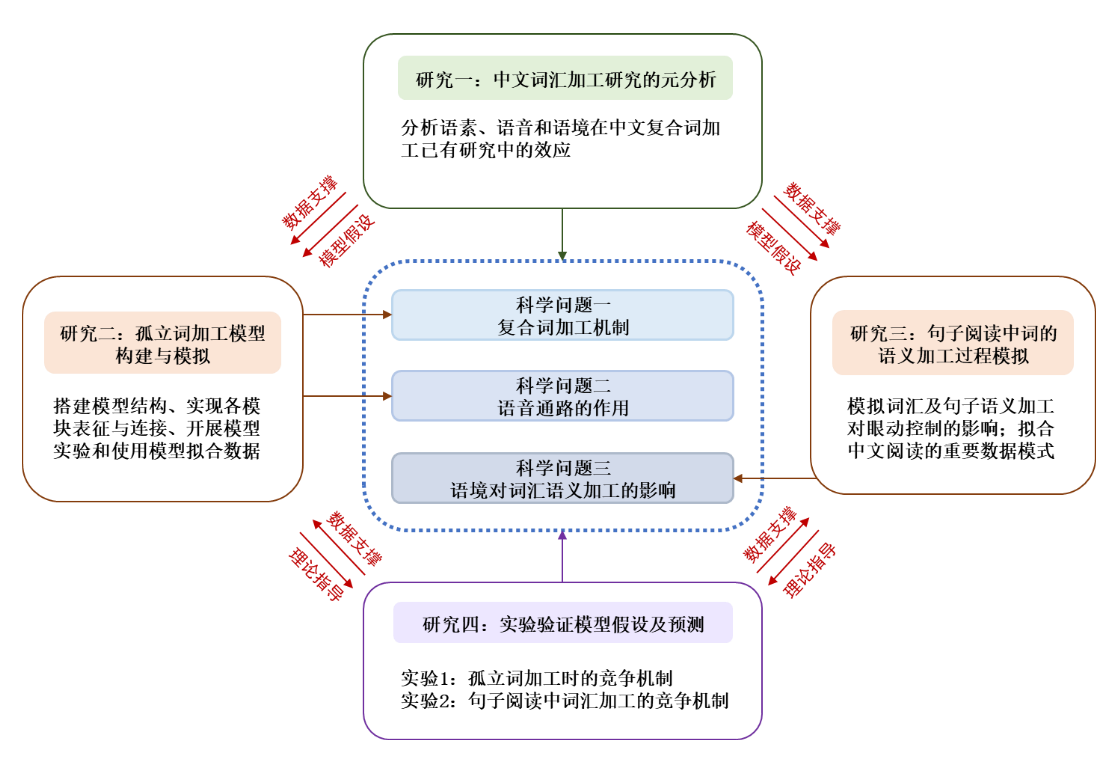


图 1 本研究框架图

4.1 中文词汇加工研究的元分析

研究一围绕三个核心科学问题对以往中文复合词加工研究分别进行元分析，估计语素、语音和语境在复合词加工中的效应量大小，检验以往研究结果的可靠性。三项元分析流程相似，具体实验研究纳入标准与编码规则不同。

在考察语素加工对复合词识别的影响的元分析中，样本包含所有操纵复合词语素特征的实验研究，将操纵语素激活较强的条件作为实验组，语素激活较弱条件作为控制组。首先对所有纳入的研究进行编码，估计总体效应大小，假如语素激活对复合词识别有影响，预期观察到显著的总体效应量，并且效应量大小反映语素对词汇加工的实际影响程度。随后分析已有研究结果之间的差异及可能来源，使用加权回归检验各潜在调节变量，包括刺激呈现方式、操纵的语素特征和词频，并检验是否存在发表偏倚。预期均存在调节效应：1）目标词单独呈现时，比嵌入在句子中呈现存在更大的语素效应；2）操纵语素语义特征，比操纵语素语音或正字法特征会产生更大的语素效应；3）加工低词频目标词比高词频目标词会产生更大的语素效应。根据元分析中估计所得总体效应量，选取单个实验效应量最接近整体的实验研究作为代表性研究，供后续模型拟合。

在考察词汇加工中的语音效应及是否通过语音中介通路通达语义的元分析

中，纳入以语音特征为自变量且实验任务包含视觉词汇加工的所有实验研究。将语音相关条件作为实验组，语音无关条件作为控制组。分析的潜在调节变量为实验范式、实验任务、加工整体或部分语音、词频和被试年龄等可能导致异质性的因素。若语音效应的总体效应量显著，则支持词汇加工中激活了语音信息。假设当实验任务为语义加工时，存在显著的语音效应且方向为促进，则说明词汇语义加工中使用语音中介通路。反之，若在调节变量的某个水平无明显语音效应，则说明语音激活及产生的影响较弱。

最后，对词汇加工中的语境效应进行元分析。纳入操纵语境特征或目标词与语境之间关系的实验研究。编码时将相对有利语境条件作为实验组，相对不利或中性语境条件作为控制组，估计总体效应大小。预期语境对词汇加工产生重要影响，表现为较大的总体效应量。潜在调节变量包括实验操纵变量、实验任务、刺激呈现方式、呈现时间和被试年龄等。根据元回归结果及不同变量水平下效应量大小差异，找出语境影响词汇加工的主要内部因素，如在什么条件下语境会对词汇加工产生更大的影响。元分析的结果为句子阅读过程中词的语义加工模型提供理论假设和数据支撑。

4.2 中文孤立词加工模型构建

研究二采用模型仿真的方法，从整体与局部竞争和模块加工的视角，探讨中文阅读中从字形通达语义的动态加工过程。本研究旨在构建中文孤立词加工的计算模型，探讨词汇语义加工中语素语义和语音通路的作用。

4.2.1 模型假设

中文孤立词语义加工模型的构建包含两个重要假设。第一，模型假设视觉词汇语义加工中激活语音的表征，因此模型包含字形、语音和语义三个模块，且模块间具有前馈和反馈连接。这意味着词汇加工时，字形到语义的直接通路和字形经过语音中介再到语义的通路都会被激活。模型实验部分将对这一假设进行验证。

第二，加工复合词时，模型假定在字形、语音和语义层次上，嵌套的单字词和复合词整词均被激活，并且二者存在竞争关系。由于竞争，单字词的激活对整词激活产生抑制效应。不同于以往大多采用整体或分解加工假设的模型，在该模型中，单字词和整词表征位于同一层且同时被激活，形、音、义多个层次上竞争的结果决定究竟是整词取胜还是单字词取胜。模型实验中，不同节点

的激活程度随时间动态变化，变化模式将检验该假设。

4.2.2 模型结构与实现

模型在整体上具有完整的三角结构，分为字形、语音和语义模块，同时使用层次网络结构，以节点表征字形、字音、词条、词的各个读音和单字词、多字词的各个语义（如图2）。模块间和模块内基于交互激活模型的表征方式来实现自下而上与自上而下信息交互。模型的基本假设体现在模块间及各模块内节点间的连接方式和强度上。模型输入为字词视觉信息，输出为识别出的词条、词义和词的读音，从输入到输出通过循环更新节点激活度，能够模拟中文词汇加工的动态过程。

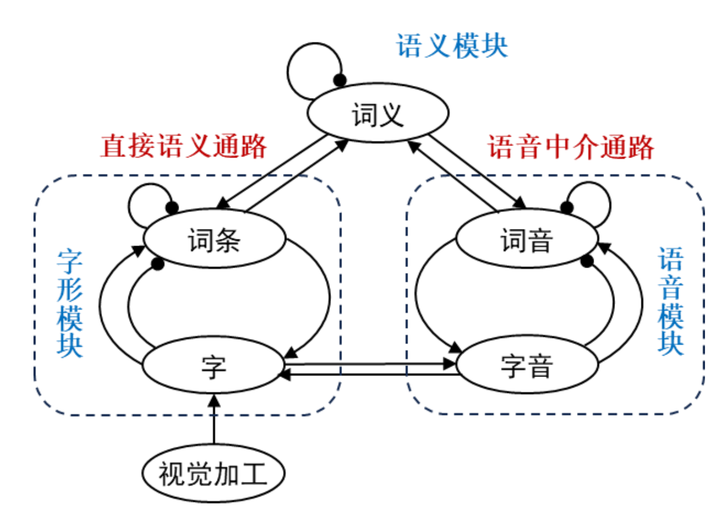


图2 中文阅读字词加工计算模型框架图

在模型实现方面，视觉层、汉字层和词条层的实现方式与 CRM 一致。语音层的激活通过字形单元激活超过阈值后激活对应字符的语音节点来实现，进而激活所有相关的词汇语音单元。在语义层，假设语义信息以语义空间的形式表征，相关性高的词距离近。一个词的语义信息被表征为一组被激活的语义单元(Landauer & Dumais, 1997)。词激活超阈值时，激活对应语义空间小区域及其中所有语义单元。小空间中心的单元激活程度最高，而距离中心位置较远的单元激活程度较低。语义空间信息的获取将采用词嵌入的方法，利用 wordVec 预训练(Mikolov et al., 2013)得到每个词的200维向量表示，通过余弦相似度计算词间语义距离。

模型假设邻近层以交互激活方式连接，非邻近层无直连。此交互连接赋予模型新特性。以语音通路为例，中文多音字和同音字众多，因此单字模型难以

确定多音字发音或直接由语音通达语义。本模型加工多字词语音为交互过程，可通过反馈连接确定多音字读音，多字词同音较少，更易激活准确语义，提高语音中介通达语义的效率。这些特点是单字词模型所不具备的。

4.2.3 模型实验

模型完成后，将通过调整结构和参数，考察其特性，以揭示词汇加工的认知机制。同时，研究将通过模拟实验考察模型假设是否能够解释已有重要发现。检验语音加工通路的作用时，通过改变模型参数调节两条通路的分工。依据不同参数，模型可以仅通过直接语义通路或仅通过语音中介通路激活语义，也可以通过两条通路合力激活语义。在建模过程中，将探讨哪种方式可以更好地拟合研究发现，从而确定最终的模型结构。另外，还将测试移除模型某个部分对模型行为的影响，考察在完全不使用语音中介通路时，是否有一些实验发现无法拟合。假如存在无法拟合的情况，将为语音中介通路的必要性提供较强的支持证据。此外，在模拟实验中观察语音、语义单元激活时序，比较不同加工单元的激活动态，为理解词汇语义加工不同通路的时间进程提供新思路。

模型将模拟中文孤立词加工，评估基于竞争机制构建的模型对中文阅读研究发现的模拟效果。拟合包括：（1）复合词加工中字的属性（如语义透明度）对加工速度的影响；（2）语音加工相关研究，探究语音激活及其在词汇加工中的作用，特别是多音字读音的确定；（3）模拟语义启动效应，包括整词语义和语素语义启动效应。这些拟合旨在评估模型效果，揭示模型结构对相关效应产生的影响，深化对认知机制的理解。

4.3 句子阅读过程中词的语义加工过程模拟

4.3.1 模型假设

研究三将整合研究二构建的孤立词加工模型和 CRM 模型中眼动控制模块，考虑语音加工、语义加工和句子语境的影响，加入新的假设，构建句子阅读过程中词的语义加工模型，以准确模拟句子阅读中的词汇加工过程，及其与眼动控制的关系。阅读的目的是理解文本语义，因此，不同于 CRM 假设视觉词汇加工程度是决定眼睛何时移动的主要因素，新假设认为语义单元激活程度是决定眼跳时机的主要因素。这一假设将有助于更准确地模拟读者在句子阅读中的词汇加工过程，从而更好地解释与语义加工相关的重要研究发现。模型的另一个重要假设是已识别词对后续词的加工产生影响。在一个词的语义被提取

出来后，构成该词义的语义单元将保持最高激活，不受其他正在加工的词影响，同时影响后续词加工。通过调整语义单元间连接强度，可以模拟语境对多义词选择的影响。

4.3.1 模型实验

本研究拟使用新构建的模型模拟如下重要实验发现：（1）预视效应，研究通常利用边界范式，探究预视词与目标词的语义相关性对注视时间的影响，结果证明读者在注视之前已经加工到词汇语义信息。这种现象对了解在一个注视点上能够加工的信息量以及词是并行还是串行加工具有重要意义。（2）多义词的语义选择。模拟 Shen 和 Li (2016)的研究结果，探究语境如何影响多义词语义选择，显示读者如何实时利用语境信息选择最合适的词义。（3）词的预测性效应。当读者能够利用语境信息预测出下一个词时，在这个词上的阅读时间将变短 (Rayner et al., 2005)。该现象说明语境信息对词义理解具有预测功能，是检验模型有效性的一个重要指标。（4）嵌套词优先整体加工。模拟中文读者如何整体加工嵌套词并与语境整合，例如句子阅读中“老板娘”的加工不受“老板”在语境中的合理性的影响 (J. M. Yang et al., 2012; J. Zhou & Li, 2021)。这些结果对理解句子阅读时词汇加工与整合的单元具有重要意义。假如模型的假设正确，模型应该能够拟合以上关键数据模式，否则需要进一步修正。

4.4 实验验证模型的核心假设及重要预测

本研究计划使用实验研究来验证模型的重要假设和预测。其中，我们将重点验证模型在复合词加工过程中提出的单字词与整词的竞争机制，在两个实验中分别考察加工孤立词和嵌入在句子中的复合词时是否存在部分单字词与整体多字词的竞争。假如模型的假设和预测得到验证，将对模型提供实证支持，并可以加深我们对中文词汇加工的理解。假如实验结果与模型的假设和预测不符，将需要对模型进行修正。通过这个过程，可以螺旋式地提升我们对中文词汇加工认知机制的理解。

4.4.1 孤立词加工中的竞争机制

实验 1 拟验证孤立词加工模型的一个重要假设：在复合词加工过程中，整词和嵌套的单字词都会被激活，并互相竞争。拟采用 2（整词词频：高频和低频）×2（单字词词频：高频和低频）被试内实验设计。实验操纵的单字词词频是指构成复合词的第一个字在语料库中作为单字词出现时的词频。中文单字词

同时具有字频与词频特征，二者高度相关但表示不同含义。以“树”为例，字频表示“树”这个字在语料库所有字里的出现频率，包括“树”“树立”“大树”等任何形式；而词频仅包含“树”作为单字词时，在所有词里的出现频率。以往研究关注字频对复合词加工的影响，由于未考虑词频的潜在影响，在操纵字频的同时存在词频的干扰。本实验的目标是检验模型关于词汇水平单字词与整词之间存在竞争的假设，因此操纵单字词词频，同时匹配字频特征。实验中，中文二字复合词孤立呈现，被试对每个出现的刺激进行词汇决定任务，实验将记录被试对每个刺激做出的按键反应和反应时间。根据模型的竞争假说，单字词和多字词之间存在词汇水平的竞争。若符合这一假说，预期单字词词频越高，二字词的词汇判断所需时间越长，词汇加工速度越慢。同时，存在整词词频和单字词词频的交互效应，在整词低频时，单字词词频的抑制效应影响更大。若不存在词汇水平的竞争，预期单字词词频的变化对词汇加工反应时无明显影响。

4.4.2 句子中词汇加工的竞争机制

实验 2 考察句子中词汇的加工机制，采用 2（单字词与整词语义相似度：高相似和低相似）×2（单字词词频：高频和低频）被试内实验设计。研究将检验在加工句子中的多字词时，嵌套的单字词是否会被激活并与整词产生竞争。如果存在竞争，竞争发生在正字法还是语义水平。目标词为中文二字复合词，同一组的四个目标词嵌入在相同的句子框架中，被试阅读理解句子，并记录眼动轨迹。拟通过比较目标词上的注视时间，来考察读者在词汇加工时是否受到复合词成分与整体语义相似度和单字词词频的影响。若符合竞争假说，预期发现单字词词频的抑制效应，即在高词频条件下，注视时间更长。反之，若由于句子语境提供了自上而下的激活，读者对词汇的加工较少依赖单个字的表征，预期不存在单字词的词频效应。若句子中的复合词加工存在语义水平的竞争，预期仅当单字词与整词语义相似度较低的情况下，存在单字词词频抑制效应，表现为包含高词频成分的复合词加工时间更长。

5 理论建构

词汇加工是阅读理解的基础，但由于中文书写系统的特异性，单个汉字具有丰富的语义信息，基于字母语言提出的词汇加工模型很难直接应用于中文词汇加工 (Li et al., 2022)。部分中文词汇加工模型仅针对单字词的加工问题，模型

引入偏旁部首和汉字的表征节点，能够模拟偏旁部首的特征对汉字识别时间的影响及字频效应 (Chang et al., 2016; Hsiao & Shillcock, 2004, 2005; Xing et al., 2002, 2004; J. F. Yang et al., 2006, 2009, 2013)。另外一些针对中文多字词加工提出的模型强调了字识别与词识别之间的交互激活，但并未涉及到语音和语义加工 (Li & Pollatsek, 2020; Yu et al., 2021)；或尚未通过计算建模实现，难以模拟词汇加工的动态过程 (Peng et al., 1999; Taft et al., 1999; Taft & Zhu, 1997)。尽管现有的模型提供了对中文字词识别和阅读过程的深入理解，但仍有许多挑战和问题需要解决。例如，中文里存在大量复合词，仅依赖拼接单字词的语音和语义难以准确加工复合词。本研究聚焦中文词汇语义加工三个关键科学问题，提出原创性中文词汇语义加工理论假设，在语音和语义层次扩展已经建立的中文阅读模型（Li & Pollatsek, 2020），分别建立孤立词加工和句子中词汇加工两个认知计算模型，并设计实验验证其假设和预期。本研究具有以下理论意义。

首先，针对中文复合词的加工机制问题，已有研究在"词是以整体进行加工的"和"词是以分解通路进行加工的"这两种观点之间争论(Cao et al., 2016; Taft et al., 1994; Tsang & Chen, 2014; G. Yan et al., 2006)。本研究提出一种新的可能性：在词形和词义的层次上，知觉广度内所有字能够组成的词都会被激活并相互竞争，包括单字词和多字词。例如，读者看到"树立"两个字时，"树"、"立"和"树立"这三个词的词形在词汇层都会被激活，且相互竞争，最终取得竞争胜利的词被切分为词，并被识别。类似的，多字词及包含的单字词在语义层也都会被激活和竞争，一端激活程度的上升将减少另一端的激活，最终激活程度相对较高且最早超过阈限的词优先通达语义。这种理论在已有研究中未见报道。本研究为复合词加工提出了一种新的理论假设，有望推动中文词汇认知加工机制的研究取得重大进展。

第二，本研究建立的模型能够模拟词汇加工过程中形、音、义的交互作用，揭示语义直接通路和语音中介通路在中文词汇加工中的分工及功能。以往研究中基于单字词的模型认为中文语义通达较少依赖语音中介，原因之一是大量同音字降低了语义通达效率(Wong et al., 2014; H. Zhang et al., 2020; X. L. Zhou et al., 1999)。然而，占据中文词汇大多数的多字词很少出现语音歧义的现象，因此可以更容易地激活相应的语义单元。多字词的加工机制与单字词不同，更有可能通过语音中介通达语义。本模型包含语音模块：当字形单元激活程度超

过阈值后，语音层内相应的语音单元及所有相关的词汇语音单元都被激活。多字词语音加工是一个交互过程，相比于仅能加工单字词的模型，该模型可以通过自上而下的连接，确定多音字的正确读音。例如“长”单独呈现时，无法确定究竟读“cháng”还是“zhǎng”，但“成长”里的“长”可以确定语音为“zhǎng”。这些特性是以往的单字词模型中不存在的。本模型充分考虑形、音、义三模块在多字词词汇加工中的动态交互，从不同加工通路协调与分工的角度解释中文词汇加工机制。这有助于完善现有词汇加工理论，进而比较各类语言加工机制的普遍性与特异性。

第三，本研究建立句子阅读过程中词汇语义加工的计算模型，充分考虑句子语境对词汇通达及眼动控制的影响。目前基于中文阅读中的词汇加工开发的计算模型较少，仅有的一些模型也仅仅聚焦于词切分和词识别问题，未涉及语义加工(Li & Pollatsek, 2020; Yu et al., 2021)。区别于以往词汇加工模型，该模型将重点解决句子加工过程中词汇语义通达可能出现的问题及表现出的眼动控制模式。其中一个重要理论假设是，前文语境对词切分和词义选择产生重要影响。该模型将能够拟合中文句子阅读过程中相关的重要研究发现，包括但不限于语义预视效应 (Shen et al., 2018; M. Yan et al., 2009) 和语义合理性效应相关研究发现 (J. M. Yang et al., 2012; Yao, et al., 2022; J. Zhou & Li, 2021)。通过输入语境语义信息、调整模型结构和参数、观察模型模拟中的动态变化，将有利于深入理解句子阅读过程中词汇语义如何通达、多义词如何选择语义、语义信息如何与前文语境整合等一系列问题，并能够阐明以往单独呈现的字词研究结果与句子阅读研究结果不一致的原因。此外，以往探讨句子阅读中词汇语义信息加工方式的实验研究数量有限，而计算模型的开发与实现将指导实验研究。

最后，本研究在技术创新与研究方法上具有贡献。与以往模型相比，本研究拟建立的模型有如下特点。第一，模型既能够加工单字词，也能够加工多字词；第二、模型能够模拟词的形、音、义加工过程，以及它们之间的交互作用；第三、能够模拟句子加工中上下文语境对词汇加工的影响。这些特点让本研究建立的计算模型能够刻画中文词汇加工的动态过程，可以在更大范围上模拟中文词汇语义加工的认知机制。

综上，本研究在技术创新上充分利用计算模型具有准确性、系统性、能够描述动态过程的特点，通过计算模拟的方式协助理解复杂中文字词识别的认知

过程，同时更好地指导实验研究。在研究方法上将实验研究与建模研究有机结合，利用实验验证模型的假设和预测；实验结果又能够推动对模型进行修正，从而螺旋式提升对中文词汇语义加工机制的理解。

参考文献

曹海波, 兰泽波, 高峰, 于海涛, 李鹏, 王敬欣. (2023). 词素位置概率在中文阅读中的作用：词汇判断和眼动研究. *心理学报*, *55*(2), 159–176. https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2023.00159

刘志方, 仝文, 张智君, 赵亚军. (2020). 语境预测性对阅读中字词加工过程的影响. *心理学报*, *52*(9), 1031–1047. https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2020.01031

申薇, 李兴珊. (2012). 中文阅读中词优效应的特异性. *科学通报*, *57*(35), 3414–3420. https://doi.org/10.1360/972012-666

王春茂, 彭聃龄. (1999). 合成词加工中的词频、词素频率及语义透明度. *心理学报*, *31*(3), 266–273.

Bai, X., Yan, G., Liversedge, S., Zang, C., & Rayner, K. (2008). Reading spaced and unspaced Chinese text: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *34*, 1277–1287. https://doi.org/10.1037/0096-1523.34.5.1277

Bemis, D. K., & Pylkkänen, L. (2011). Simple composition: A magnetoencephalography investigation into the comprehension of minimal linguistic phrases. *The Journal of Neuroscience*, *31*(8), 2801–2814. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5003-10.2011

Cao, H., Gao, M., & Yan, H. (2016). Character decomposition and transposition processes in Chinese compound words modulates attentional blink. *Frontiers in Psychology*, *7*, 923. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00923

Chang, Y.-N., Welbourne, S., & Lee, C.-Y. (2016). Exploring orthographic neighborhood size effects in a computational model of Chinese character naming. *Cognitive Psychology*, *91*, 1–23. https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2016.09.001

Chen, L., Perfetti, C., Leng, Y., & Li, Y. (2018). Word superiority effect for native Chinese readers and low-proficiency Chinese learners. *Applied Psycholinguistics*, *39*(6), 1097–1115. https://doi.org/10.1017/S0142716418000255

Cui, L., Wang, J., Zhang, Y., Cong, F., Zhang, W., & Hyona, J. (2021). Compound word frequency modifies the effect of character frequency in reading Chinese. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *74*(4), 610–633. https://doi.org/10.1177/1747021820973661

Cui, L., Zang, C., Xu, X., Zhang, W., Su, Y., & Liversedge, S. P. (2022). Predictability effects and parafoveal processing of compound words in natural Chinese reading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *75*(1), 18–29. https://doi.org/10.1177/17470218211048193

Dehaene, S. (2009). *Reading in the brain: The science and evolution of a human invention*. New York, NY: Penguin Press. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:141548807

Engbert, R., & Kliegl, R. (2011). Parallel graded attention models of reading. In S. P. Liversedge, I. D. Gilchrist, & S. Everling (Eds.), *The Oxford handbook of eye movements.* (pp. 787–800). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199539789.001.0001

Flick, G., Oseki, Y., Kaczmarek, A. R., Al Kaabi, M., Marantz, A., & Pylkkänen, L. (2018). Building words and phrases in the left temporal lobe. *Cortex*, *106*, 213–236. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.06.004

Harm, M. W., & Seidenberg, M. S. (2004). Computing the meanings of words in reading: Cooperative division of labor between visual and phonological processes. *Psychological Review*, *111*(3), 662–720. https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.3.662

Hsiao, J. H., & Shillcock, R. (2004). Connectionist modelling of Chinese character pronunciation based on foveal splitting. In *Proceedings of the Twenty-Sixth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 601–606). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. http://csjarchive.cogsci.rpi.edu/Proceedings/2004/CogSci04.pdf

Hsiao, J. H., & Shillcock, R. (2005). Foveal splitting causes differential processing of Chinese orthography in the male and female brain. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, *25*(2), 531–536. https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.08.005

Hsu, C.-H., Pylkkänen, L., & Lee, C.-Y. (2019). Effects of morphological complexity in left temporal cortex: An MEG study of reading Chinese disyllabic words. *Journal of Neurolinguistics*, *49*, 168–177. https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2018.06.004

Huang, L., & Li, X. (2020). Early, but not overwhelming: The effect of prior context on segmenting overlapping ambiguous strings when reading Chinese. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *73*(9), 1382–1395. https://doi.org/10.1177/1747021820926012

Huang, L., Staub, A., & Li, X. (2021). Prior context influences lexical competition when segmenting Chinese overlapping ambiguous strings. *Journal of Memory and Language*, *118*, 104218. https://doi.org/10.1016/j.jml.2021.104218

Inhoff, A. W., & Wu, C. (2005). Eye movements and the identification of spatially ambiguous words during Chinese sentence reading. *Memory & Cognition*, *33*(8), 1345–1356. https://doi.org/10.3758/BF03193367

Landauer, T. K., & Dumais, S. T. (1997). A solution to Plato's problem: The latent semantic analysis theory of acquisition, induction, and representation of knowledge. *Psychological Review*, *104*(2), 211–240.

Leck, K. J., Weekes, B. S., & Chen, M. J. (1995). Visual and phonological pathways to the lexicon: Evidence from Chinese readers. *Memory & Cognition*, *23*(4), 468–476. https://doi.org/10.3758/bf03197248

Li, X., Bicknell, K., Liu, P., Wei, W., & Rayner, K. (2014). Reading is fundamentally similar across disparate writing systems: A systematic characterization of how words and characters influence eye movements in Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: General*, *143*(2), 895–913. https://doi.org/10.1037/a0033580

Li, X., Gu, J., Liu, P., & Rayner, K. (2013). The advantage of word-based processing in Chinese reading: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *39*(3), 879–889. https://doi.org/10.1037/a0030337

Li, X., Huang, L., Yao, P., & Hyönä, J. (2022). Universal and specific reading mechanisms across different writing systems. *Nature Reviews Psychology*, *1*(3), 133–144. https://doi.org/10.1038/s44159-022-00022-6

Li, X., & Pollatsek, A. (2020). An integrated model of word processing and eye-movement control during Chinese reading. *Psychological Review*, *127*(6), 1139–1162. https://doi.org/10.1037/rev0000248

Li, X., Rayner, K., & Cave, K. R. (2009). On the segmentation of Chinese words during reading. *Cognitive Psychology*, *58*(4), 525–552. https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2009.02.003

Ma, G., Li, X., & Rayner, K. (2014). Word segmentation of overlapping ambiguous strings during

Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *40*(3), 1046–1059. https://doi.org/10.1037/a0035389

Ma, G., Li, X., & Rayner, K. (2015). Readers extract character frequency information from nonfixated-target word at long pretarget fixations during Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *41*(5), 1409–1419. https://doi.org/10.1037/xhp0000072

McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: I. An account of basic findings. *Psychological Review*, *88*(5), 375–407. https://doi.org/10.1037/0033-295X.88.5.375

McCutchen, D., & Perfetti, C. A. (1982). The visual tongue-twister effect: Phonological activation in silent reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *21*(6), 672–687. https://doi.org/10.1016/S0022-5371(82)90870-2

Mikolov, T., Sutskever, I., Chen, K., Corrado, G. s, & Dean, J. (2013). Distributed representations of words and phrases and their compositionality. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *26*, 3111–3119.

Peng, D. L., Liu, Y., & Wang, C. (1999). How is access representation organized? The relation of polymorphemic words and their morphemes in Chinese. In J. Wang, A. W. Inhoff, & H.-C. Chen (Eds.), *Reading Chinese script: A cognitive analysis* (pp. 65–89). Erlbaum.

Perfetti, C. A., Liu, Y., & Tan, L. H. (2005). The lexical constituency model: Some implications of research on Chinese for general theories of reading. *Psychological Review*, *112*(1), 43–59. https://doi.org/10.1037/0033-295X.112.1.43

Perfetti, C. A., & Zhang, S. (1995). Very early phonological activation in Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*(1), 24–33. https://doi.org/10.1037/0278-7393.21.1.24

Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S., & Patterson, K. (1996). Understanding normal and impaired word reading: Computational principles in quasi-regular domains. *Psychological Review*, *103*(1), 56–115. https://doi.org/10.1037/0033-295X.103.1.56

Pylkkänen, L. (2020). Neural basis of basic composition: What we have learned from the red–boat studies and their extensions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *375*(1791), 20190299. https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0299

Rayner, K., Li, X., Juhasz, B. J., & Yan, G. (2005). The effect of word predictability on the eye movements of Chinese readers. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*(6), 1089–1093. https://doi.org/10.3758/BF03206448

Rayner, K., Pollatsek, A., Ashby, J., & Clifton Jr, C. (2011). *Psychology of Reading: 2nd Edition (1st ed.).* London, UK: Psychology Press. https://doi.org/10.4324/9780203155158

Reicher, G. M. (1969). Perceptual recognition as a function of meaninfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, *81*(2), 275–280. https://doi.org/10.1037/h0027768

Reichle, E. D. (2021). *Computational models of reading: A handbook.* Oxford, UK: Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780195370669.001.0001

Reichle, E. D., Pollatsek, A., Fisher, D. L., & Rayner, K. (1998). Toward a model of eye movement control in reading. *Psychological Review*, *105*(1), 125–157. https://doi.org/10.1037/0033-295x.105.1.125

Seidenberg, M. S. (2017). *Language at the Speed of Sight: How We Read, Why so Many Can't, and What Can Be Done about It.* New York: Basic Books.

Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, *96*(4), 523–568. https://doi.org/10.1037/0033-295x.96.4.523

Share, D. L. (2008). On the Anglocentricities of current reading research and practice: The perils of overreliance on an "outlier" orthography. *Psychological Bulletin*, *134*(4), 584–615.

Shen, W., & Li, X. (2016). Processing and representation of ambiguous words in Chinese reading: Evidence from eye movements. *Frontiers in Psychology*, *7*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01713

Shen, W., Li, X., & Pollatsek, A. (2018). The processing of Chinese compound words with ambiguous morphemes in sentence context. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *71*(1), 131–139. https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1270975

Taft, M., Huang, J., & Zhu, X. (1994). The influence of character frequency on word recognition responses in Chinese. In H. W. Chang, J. T. Hung, C. W. Hue, & O. Tzeng (Eds.), *Advances in the study of Chinese language processing* (pp. 59–73). Taipei: National Taiwan University.

Taft, M., & Nguyen-Hoan, M. (2010). A sticky stick? The locus of morphological representation in the lexicon. *Language and Cognitive Processes*, *25*(2), 277–296. https://doi.org/10.1080/01690960903043261

Taft, M., & Zhu, X. P. (1997). Submorphemic processing in reading Chinese. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, *23*(3), 761–775. https://doi.org/10.1037/0278-7393.23.3.761

Taft, M., Zhu, X., & Peng, D. (1999). Positional specificity of radicals in Chinese character Recognition. *Journal of Memory and Language*, *40*(4), 498–519. https://doi.org/10.1006/jmla.1998.2625

Tan, L. H., & Perfetti, C. A. (1997). Visual Chinese character recognition: Does phonological information mediate access to meaning? *Journal of Memory and Language*, *37*(1), 41–57. https://doi.org/10.1006/jmla.1997.2508

Tan, L. H., & Perfetti, C. A. (1998). Phonological codes as early sources of constraint in Chinese word identification: A review of current discoveries and theoretical accounts. In C. K. Leong & K. Tamaoka (Eds.), *Cognitive Processing of the Chinese and the Japanese Languages* (Vol. 14, pp. 11–46). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9161-4_2

Tan, L. H., & Perfetti, C. A. (1999). Phonological activation in visual identification of Chinese two-character words. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *25*(2), 382–393.

Tsang, Y.-K., & Chen, H.-C. (2013). Early morphological processing is sensitive to morphemic meanings: Evidence from processing ambiguous morphemes. *Journal of Memory and Language*, *68*(3), 223–239. https://doi.org/10.1016/j.jml.2012.11.003

Tsang, Y.-K., & Chen, H.-C. (2014). Activation of morphemic meanings in processing opaque words. *Psychonomic Bulletin & Review*, *21*(5), 1281–1286. https://doi.org/10.3758/s13423-014-0589-2

Tsang, Y.-K., Wong, A. W.-K., Huang, J., & Chen, H.-C. (2014). Morpho-orthographic and morpho-semantic processing in word recognition and production: Evidence from ambiguous morphemes. *Language, Cognition and Neuroscience*, *29*(5), 543–560. https://doi.org/10.1080/01690965.2013.790554

Tse, C.-S., & Yap, M. J. (2018). The role of lexical variables in the visual recognition of two-

character Chinese compound words: A megastudy analysis. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *71*(9), 2022–2038. https://doi.org/10.1177/1747021817738965

Van Orden, G. C., & Kloos, H. (2005). The Question of Phonology and Reading. In *The science of reading: A handbook.* (pp. 61–78). Blackwell Publishing. https://doi.org/10.1002/9780470757642.ch4

Westerlund, M., & Pylkkänen, L. (2014). The role of the left anterior temporal lobe in semantic composition vs. Semantic memory. *Neuropsychologia*, *57*, 59–70. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.03.001

Wong, A. W.-K., Wu, Y., & Chew, H.-C. (2014). Limited role of phonology in reading Chinese two-character compounds: Evidence from an ERP study. *Neuroscience*, *256*, 342–351. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2013.10.035

Xing, H., Shu, H., & Li, P. (2002). A self-organizing connectionist model of character acquisition in Chinese. In W.D. Gray & C.D. Schunn (Eds.), *Proceedings of the Twenty-Fourth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 950–955). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum. https://doi.org/10.4324/9781315782379-198

Xing, H., Shu, H., & Li, P. (2004). The acquisition of Chinese characters: Corpus analyses and connectionist simulations. *Journal of Cognitive Science*, *5*(1), 1–49.

Xiong, J., Yu, L., Veldre, A., Reichle, E. D., & Andrews, S. (2023). A multitask comparison of word- and character-frequency effects in Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *49*(5), 793–811. https://doi.org/10.1037/xlm0001192

Yan, G., Tian, H., Bai, X., & Rayner, K. (2006). The effect of word and character frequency on the eye movements of Chinese readers. *British Journal of Psychology*, *97*(2), 259–268. https://doi.org/10.1348/000712605X70066

Yan, M., Richter, E. M., Shu, H., & Kliegl, R. (2009). Readers of Chinese extract semantic information from parafoveal words. *Psychonomic Bulletin & Review*, *16*(3), 561–566. https://doi.org/10.3758/pbr.16.3.561

Yang, J. F., Zevin, J. D., Shu, H., McCandliss, B. D., & Li, P. (2006). A “triangle model” of Chinese reading. In R. Sun (Eds.), *Proceedings of the Twenty Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 912–917). Erlbaum.

Yang, J. F., McCandliss, B. D., Shu, H., & Zevin, J. D. (2009). Simulating language-specific and language-general effects in a statistical learning model of Chinese reading. *Journal of Memory and Language*, *61*(2), 238–257. https://doi.org/10.1016/j.jml.2009.05.001

Yang, J. F., Shu, H., McCandliss, B. D., & Zevin, J. D. (2013). Orthographic influences on division of labor in learning to read Chinese and English: Insights from computational modeling. *Bilingualism: Language and Cognition,* *16*(2), 354–366. https://doi.org/10.1017/S1366728912000296

Yang, J. M., Staub, A., Li, N., Wang, S., & Rayner, K. (2012). Plausibility effects when reading one- and two-character words in Chinese: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *38*(6), 1801–1809. https://doi.org/10.1037/a0028478

Yao, P., Alkhammash, R., & Li, X. (2022). Plausibility and syntactic reanalysis in processing novel noun-noun combinations during Chinese reading: Evidence from native and non-native speakers. *Scientific Studies of Reading*, *26*(5), 390–408. https://doi.org/10.1080/10888438.2021.2020796

Yao, P., Staub, A., & Li, X. (2022). Predictability eliminates neighborhood effects during Chinese sentence reading. *Psychonomic Bulletin & Review*, *29*(1), 243–252. https://doi.org/10.3758/s13423-021-01966-1

Yu, L., Cutter, M. G., Yan, G., Bai, X., Fu, Y., Drieghe, D., & Liversedge, S. P. (2016). Word n + 2 preview effects in three-character Chinese idioms and phrases. *Language, Cognition and Neuroscience*, *31*(9), 1130–1149. https://doi.org/10.1080/23273798.2016.1197954

Yu, L., Liu, Y., & Reichle, E. D. (2021). A corpus-based versus experimental examination of word- and character-frequency effects in Chinese reading: Theoretical implications for models of reading. *Journal of Experimental Psychology: General*, *150*(8), 1612–1641. https://doi.org/10.1037/xge0001014

Zang, C. (2019). New perspectives on serialism and parallelism in oculomotor control during reading: The multi-constituent unit hypothesis. *Vision*, *3*(4), 50. https://doi.org/10.3390/vision3040050

Zhang, H., Su, I.-F., Chen, F., Ng, M. L., Wang, L., & Yan, N. (2020). The time course of orthographic and semantic activation in Chinese character recognition: Evidence from anERP study. *Language, Cognition and Neuroscience*, *35*(3), 292–309. https://doi.org/10.1080/23273798.2019.1652762

Zhang, S., & Perfetti, C. A. (1993). The tongue-twister effect in reading Chinese. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *19*(5), 1082–1093. https://doi.org/10.1037/0278-7393.19.5.1082

Zhou, J., & Li, X. (2021). On the segmentation of Chinese incremental words. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *47*(8), 1353–1368. https://doi.org/10.1037/xlm0000984

Zhou, W., Shu, H., Miller, K., & Yan, M. (2018). Reliance on orthography and phonology in reading of Chinese: A developmental study. *Journal of Research in Reading*, *41*(2), 370–391. https://doi.org/10.1111/1467-9817.12111

Zhou, X., & Marslen-Wilson, W. (2000). The relative time course of semantic and phonological activation in reading Chinese. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, *26*(5), 1245–1265. https://doi.org/10.1037//0278-7393.26.5.1245

Zhou, X., Marslen-Wilson, W., Taft, M., & Shu, H. (1999). Morphology, orthography, and phonology in reading Chinese compound words. *Language and Cognitive Processes*, *14*(5–6), 525–565. https://doi.org/10.1080/016909699386185

Zhou, X., Ye, Z., Cheung, H., & Chen, H.-C. (2009). Processing the Chinese language: An introduction. *Language and Cognitive Processes*, *24*(7–8), 929–946. https://doi.org/10.1080/01690960903201281

Computational modeling and experimental validation of Chinese lexical and semantic processing

LI Xingshan[1,2], ZHANG Qiwei[1,2], HUANG Linjieqiong[1]

([1]CAS Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Beijing 100101, China)
([2]Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Chinese is a writing system widely used by Chinese people worldwide and has many distinct characteristics. Due to its uniqueness, theories and models of alphabetic languages cannot be directly applied to Chinese. Previous Chinese studies lack systematic computational models for lexical and semantic processing. To address this issue, this study first plans to conduct a systematic review and meta-analysis of previous literature. Next, computational models will be constructed to simulate the processing of Chinese word presented in isolation and during natural reading. The model has the following characteristics: a) it can process both single-character and multi-character words; b) it can simulate orthographic, phonological, and semantic processing of words, as well as their interactions; c) it can simulate the impact of contextual cues on word processing during sentence comprehension. Finally, the assumptions and predictions of the model are planned to be validated in experimental studies. The established model can guide experimental research and has significant theoretical significance. The research findings will help clarify the cognitive mechanisms of Chinese reading and the dynamic process of lexical processing.
Keywords: cognitive simulation, lexical processing, semantic processing, Chinese reading, computational modelling